

海色センサ MODIS を用いた広島湾の赤潮分布推定

作 野 裕 司*・山 口 大 輔**

本研究は、海色センサ MODIS データを使って広島湾の赤潮分布を推定するモデルを提案し、このモデルの妥当性を現場データ及び水中光学モデルを使って検証・考察した。その結果、広島湾における赤潮（高濃度クロロフィル a 濃度 (Chl-a)）推定モデルとして提案した MODIS 「バンド 14 (678 nm) とバンド 13 (667 nm) の輝度比」は、外洋モデルと比べ現場 Chl-a との相関が高く ($R=0.82$)、Chl-a 推定精度は $0.66 \mu\text{g/l}$ (RMS 誤差) であった。また、水中光学モデルによると、提案したモデルは無機懸濁物質の影響を抑える効果があり、高濃度の Chl-a 推定モデルとして妥当であると考えられた。

1. はじめに

近年広島湾では、赤潮により牡蠣の養殖等に多大な被害を及ぼしている。このような被害防止や被害対策を議論する上で赤潮分布を把握・予測することは非常に重要である。しかし赤潮は広域的・突発的に発生するため、船舶調査だけではその実態を捉えることは難しかった。このような水域における時空間的な現状を把握するにはリモートセンシング(RS)が適している。RS 技術で赤潮分布を推定する場合は、毎日データが得られる海色センサを利用する方法が考えられるが、従来の沿岸 RS 研究では無機懸濁物質や溶存有機物の影響等で分光特性が複雑になるため、赤潮分布推定は難しかった。そこで、本研究では毎日無料で提供される海色センサ MODIS を利用し、従来使われなかったバンド（波長帯）の組み合わせにより、赤潮分布を推定するモデルを提案し、このモデルの妥当性を現場データ及び水中光学モデルを使って検証・考察することを目的とした。

2. 衛星データによる赤潮(高 Chl-a 濃度)推定方法

(1) 衛星海色センサ MODIS について

MODIS は Terra 及び Aqua (1999 年 12 月と 2002 年 5 月にそれぞれ打ち上げ) と呼ばれる衛星に搭載された中分解能分光放射計である。このセンサは 2330 km の観測幅を持ち、観測波長と解像度の異なる 36 バンドにより構成されている。このうち、海色の指標であるクロロフィル a 濃度（以下「Chl-a」と略す）の推定に通常使用されるのは表-1 に示したバンド 8～バンド 16 のデータであり、解像度は 1 km、昼間の観測周期は 1 日に 1～2 回程度（Terra/Aqua を合わせて 2～4 回程度）で午前 11 時頃（Terra）と午後 1 時頃（Aqua）に観測する。

(2) 高 Chl-a (赤潮) 推定モデル

一般に海色センサによる Chl-a 推定には、Chl-a の強い

表-1 MODIS センサの諸元

バンド No.	観測バンド (nm)	バンド幅	解像度 (m)
8	405-420	15	1000
9	438-448	10	
10	483-493	10	
11	526-536	10	
12	546-556	10	
13	662-672	10	
14	673-683	10	
15	743-753	10	
16	862-877	15	

吸収帯である可視の青バンドと Chl-a の吸収に無関係である緑バンドの放射輝度比又は反射率比が有効であることが知られている。例えば外洋の MODIS の Chl-a 推定アルゴリズムは以下のような式が使われる (Clark, 1997)。

$$\log_{10}(\text{Chl-a}) = \alpha \log_{10}[L_w \text{Band9}(443\text{nm})/L_w \text{Band12}(550\text{nm})] + \beta \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 α 及び β は定数、 L_w は水面直上の放射輝度(大気補正済み)、Band 9、Band 12 はそれぞれ MODIS バンド 9、バンド 12 を表している。

一方、式(1)のような推定モデルでは、沿岸の高 Chl-a 濃度を推定することは難しい場合が多い。そこで、高 Chl-a 濃度の水域において Chl-a を推定するための水面直上分光反射率測定実験が霞ヶ浦等で継続的に行われている(岡見ら, 1982; Okami ら, 1982; 沖・安岡, 1996; Thiemann・Kaufmann, 2002)。それらの研究結果から最近では高 Chl-a 濃度水域に有効とされている Chl-a 推定モデルとして、675 nm 付近と 700 nm 付近の輝度比(対数はとらない形)が提案されている。MODIS ではこの波長帯と完全に合致するバンドがないが、最も近い波長域を選択するとバンド 13 とバンド 14 となる。そこで、本研究では新たな高 Chl-a (赤潮) 推定式として次式を提案する。

* 正会員 博(工) 広島大学助手大学院工学研究科社会環境システム専攻
** 広島大学工学部第四類 (現, アイン食品(株))

$$\text{Chl-a} = \alpha [L_w \text{ Band14}(678\text{nm}) / L_w \text{ Band13}(667\text{nm})] + \beta' \dots\dots(2)$$

ここで、 α' 及び β' は定数、 L_w は水面直上の放射輝度(大気補正済み)、Band 13、Band 14 はそれぞれ MODIS バンド 13、バンド 14 を表している。

3. 使用した衛星/現場データセット

本研究では、前述した海色センサ MODIS データの原データに近い放射輝度データを式(2)に代入して、現場 Chl-a データとの関係を調べる。今回使用した衛星データは東京大学生産技術研究所が無料で提供している MODIS の放射輝度データ(レベル 1b)である。また衛星データの大气補正として、各バンドの最小値を大気散乱光と仮定して差し引く簡易的な処理を行った(土田, 1998; 松永ら, 2003)。一方、現場 Chl-a データは、図-1に示す測点で、広島県水産試験場が広島湾で毎月観測している 2001 年~2002 年における浅海定線調査の表層データを用いた。ただし、MODIS と広島湾の Chl-a が同期して得られたデータが極めて少ない為、今回は広島湾以外の測点(安芸灘、播磨灘、紀伊水道、伊予灘)において国土交通省が船舶により定期測定している瀬戸内海総合水質調査の上層データ 4 点(2001 年 8 月 23・29 日, 10 月 15・19 日の各 1 点)を加えて解析した。その結果、衛星/現場データセットとして使用できたのは、雲やノイズ等のない 8 日分、計 15 点となった。

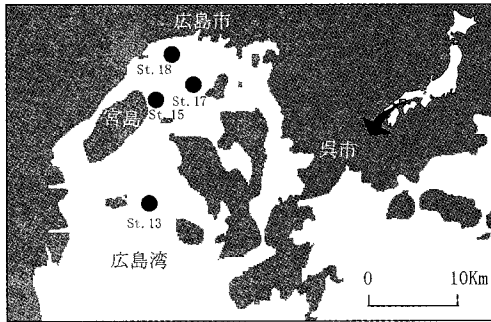


図-1 検証データとして使用した広島湾内の Chl-a 測点(広島県水産試験場の浅海定線調査資料による)

4. 現場データによる赤潮推定モデルの検証

表-2 に大気補正前後の MODIS バンド比と現場 Chl-a の関係(相関係数)を示す。これより、提案した「バンド 14 (678 nm) とバンド 13 (667 nm) の大気補正後の輝度比」が従来の「443 nm (又は 531 nm) と 551 nm の輝度比」(外洋モデル)等と比べて相関がかなり高くなっていることがわかる。

また、図-2 に大気補正前後の MODIS「バンド 14 とバンド 13 の比」と「現場 Chl-a」の関係を示す。これらの図から、大気補正を行うことにより、各日にちの輝度値の差が測点により広がり、かつ一直線状に整列することがわかる。このような結果は今回のような簡易的な大気補正でも大気の影響を抑制することができ、かつ式(2)のモデルが妥当であったことを示していると考えられる。以上の結果から、広島湾における高 Chl-a (赤潮) 推定式として、図-2(b) の回帰式から次式を提案する。

表-2 MODIS のバンド比と現場 Chl-a の相関係数

バンド比	大気補正	
	前	後
Band 9(443 nm)/Band 12(551 nm)	-0.22	0.08
Band 11(531 nm)/Band 12(551 nm)	-0.54	0.14
Band 14(678 nm)/Band 13(667 nm)	0.48	0.82
Band 15(748 nm)/Band 14(678 nm)	0.49	0.50

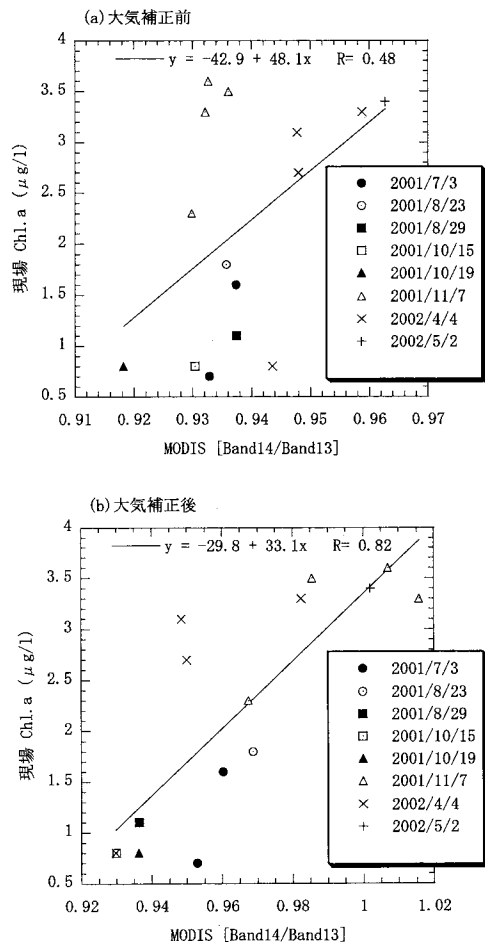


図-2 大気補正前後の MODIS「バンド 14 とバンド 13 の比」と「現場 Chl-a」の関係

$$\text{Cha-a} = 33.1 \times [L_w \text{ Band14}(678\text{nm}) / L_w \text{ Band13}(667\text{nm})] - 29.8 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 L_w は簡易大気補正後のMODISの輝度値であり、この式による推定精度は $0.66 \mu\text{g/l}$ (RMS誤差)である。

5. 水中光学モデルによる赤潮推定モデルの検証

次に提案したMODISの輝度比がなぜ現場Chl-a濃度と相関が高くなったかを水中光学モデル(水中懸濁物質の吸収・散乱係数から水中の分光反射率を計算で導く方法)により考察する。

一般に水面直下の水中分光反射率 R_w は、最も簡単な形としては次式で表される。

$$R_w(\lambda) = n[b_b(\lambda)/a(\lambda)] \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 a は吸収係数、 b_b は後方散乱係数、 λ は波長である。また n は定数で通常海域の特性により0.33や0.50等の数値が使われる。さらに、 a と b_b はそれぞれ、以下の式で表される。

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + a_c(\lambda, \text{Chl-a}) + a_y(\lambda, \text{ISM}) \quad \dots\dots (5)$$

$$b_b(\lambda) = b_{bw}(\lambda) + b_{bc}(\lambda, \text{Chl-a}) + b_{by}(\lambda, \text{ISM}) \quad \dots (6)$$

ここで、 a_w は水による吸収係数、 a_c はChl-aによる吸収係数、 a_y はCDOMによる吸収係数を表している。また b_{bw} は水による後方散乱係数、 b_{bs} は無機懸濁物質(ISM)による後方散乱係数を表している。

今回は、式(4)、式(5)、式(6)を用いて、水面直下の水中分光反射率を計算し、式(2)のような高Chl-a(赤潮)推定モデルが有効であることの検証を試みた。具体的な入力した吸収係数、後方散乱係数は、ADEOS2/GLI海色大気補正アルゴリズム(虎谷ら、2003)を参考として、以下のような式を用いた。ただし a_w の値はMorel・Prieur(1977)が純水で測定した値をそのまま使用した。

$$a_c(\lambda) = a_{cs}(\lambda) \text{Chl-a} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$a_y(\lambda) = a_y(440) \exp\{-0.014(\lambda - 440)\} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$b_{bw}(\lambda) = 0.00144(\lambda/550)^{-4.32} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$b_{bc}(\lambda) = 0.081 b_c(\lambda) \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$b_c(\lambda) = 0.27[\text{Chl-a}]^{0.698}(\lambda/550)^{-0.2933} \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$b_{bn}(\lambda) = 0.01478 b_n(\lambda) \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$b_s(\lambda) = 0.125[\text{ISM}](\lambda/550)^{-0.812} \quad \dots\dots\dots (13)$$

ここで、 a_{cs} は「Chl-aあたりの吸収係数」であるが、この値は植物プランクトンの種類や水域によって異なり、広島湾における任意の期日の正確な値を得ることは難しい。従って今回は一般的な値として、Morel・Prieur(1977)のグラフからの読み取り値で与えた。また、Chl-a

は a_{cs} データの実験条件であり、かつ広島湾では極めて高濃度である値の代表値として10とし、同様にISMも10と設定した。さらに、 $a_y(440)$ の値も、Morel・Prieur(1977)の実験値0.1(グラフから読み取り)を与えた。

以上のように設定した式及び値を使って、異なるChl-a濃度条件下の分光反射率を計算した結果を図-3に示す(ただし式(4)の n は、今回海域を特定しないという理由から1として計算した)。図-3より、外洋の低Chl-a($1 \mu\text{g/l}$ 以下)は551 nm付近ではほぼ同様の値を示し、それより短波長ではChl-aが高いほど反射率は低くなる。一方、高Chl-a水域($1 \mu\text{g/l}$ 以上)では550 nm付近で反射率がばらつく等、外洋モデルの使用が困難になることがわかる。一方、提案した赤潮モデルのうち、678 nm付近ではChl-aの蛍光等でChl-a濃度が高いほど反射率は高くなる。また667 nm付近ではChl-aの吸収により反射率は低くなる、又は一定値に近づく。これらの結果を総合すると、本研究で提案したバンド比は、Chl-aの吸収・散乱(又は蛍光)の特徴を増大させることができるため、赤潮分布推定が可能となると考えられる。

さらに、今回モデルに使用した「678 nmと667 nmの比」がISMの影響をうけない理由を、沖・安岡(1996)が行った水中光学モデルを使った検証方法で、検証する。彼らはまず、可視の長波長帯及び近赤外帯の後方散乱係数は次のような関係があるとした。

$$b_{bw} \ll b_{by} \quad \dots\dots\dots (14)$$

また、懸濁物質による後方散乱係数は波長依存性がなく一定であると仮定した。これらの仮定を本研究においても適用すると、波長667 nmと678 nmにおいて、次のような等式が成り立つ。

$$b_{bc}(667) + b_{by}(667) = b_{bc}(678) + b_{by}(678) \quad \dots (15)$$

さらに式(14)と式(15)より式(6)は次式で表わせる。

$$\begin{aligned} b_b(667) &= b_{bw}(667) + b_{bc}(667) + b_{by}(667) \\ &= b_{bc}(667) + b_{by}(667) \\ &= b_{bc}(678) + b_{by}(678) \\ &= b_b(678) \quad \dots\dots\dots (16) \end{aligned}$$

よって式(4)、式(5)、式(6)、式(7)及び式(16)より「678 nmと667 nmの反射率比」は、以下の式で表せる。

$$\begin{aligned} [R_w(678)/R_w(667)] &= [a(667)/a(678)] \\ &= [a_w(667) + a_y(667) + a_{cs}(667) \text{Chl-a}] \\ &\quad / [a_w(678) + a_y(678) + a_{cs}(678) \text{Chl-a}] \quad \dots (17) \end{aligned}$$

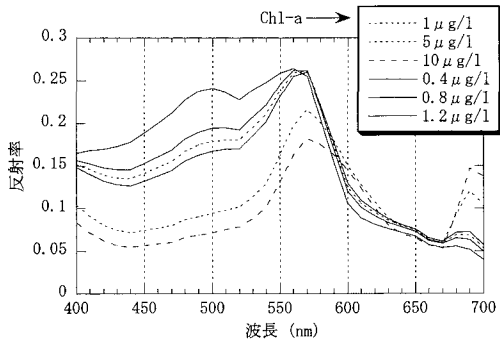


図-3 水中光学モデルから導出した異なるChl-aによる分光反射率特性。反射率計算にはADEOS-2/GLIアルゴリズム採用モデルを使用。

式(17)より、「678 nmと667 nmの反射率比」は、水中に含まれる物質の吸収係数だけで表わすことができ、水中に含まれる無機懸濁物質(ISM)の後方散乱の影響を避けることができる。厳密に言えば、今回使用したモデルは輝度比であるが、比演算を行うことで入射光量の影響は極めて小さくなり、輝度比と反射率比は同様の論理が成り立つ。従って、今回提案した赤潮モデルは妥当だと考えられる。

6. 広島湾におけるMODIS Chl-a分布と赤潮分布の比較

図-4(a)は今回提案した赤潮モデルをMODISデータに適用して、赤潮発生時に推定した広島湾のChl-a分布図(2003年9月4日)である。図-4(b)は同日に現場計測された赤潮分布であり、MODISの赤潮分布とよく一致している。

広島県水産試験場の報告によると、同日発生した赤潮は渦鞭毛藻類の「ギムノディニウム・ミキモイ」であった。この赤潮は「ヘテロカプサ・サーキュラリスカーマ」とともに広島湾を代表する有害プランクトンである(松山ら, 1997)。特に赤潮が顕著に発生した峠島(広島湾北東部)の細胞数は水深0 mで24000細胞/ml(一般に数千[細胞/ml]以上になると魚介類のへい死を引き起こす恐れがあると言われる)であった。また赤潮分布としては前述した峠島他、金輪、絵の島(図-4(b)参照)で高密度(いずれの地点も4000細胞/ml以上)であることが現地で計測されており、この地点間を埋めるように湾北東部から江田島湾の湾口付近にかけて赤潮が伸びている様子がMODIS画像から読み取ることができる。

さらに、図-5は両者の関係を定量的に比較した結果である。図-5より、MODIS Chl-aが3 µg/l以下の場所では赤潮は発生しておらず、MODIS Chl-aが3.5~5 µg/lの場所では赤潮は5000細胞/ml、それ以上のときは

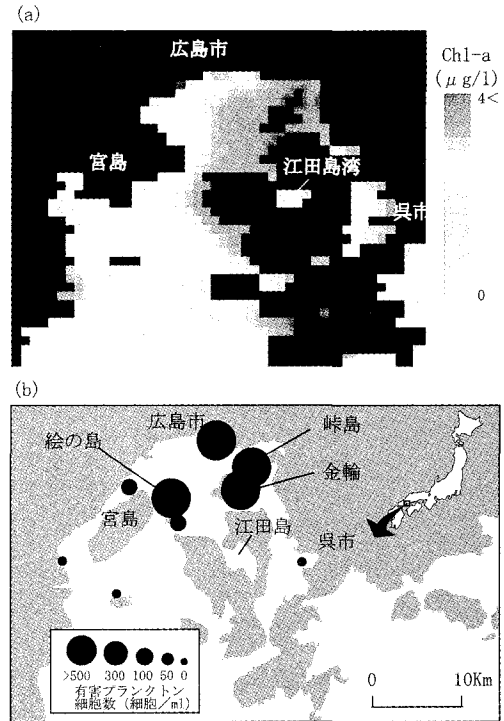


図-4 広島湾の赤潮発生時(2003年9月4日)における提案モデルによるMODIS Chl-a図と実測の赤潮分布(有害プランクトン細胞数)図の比較。実測の値は広島県水産試験場がホームページで公開しているデータを使用。

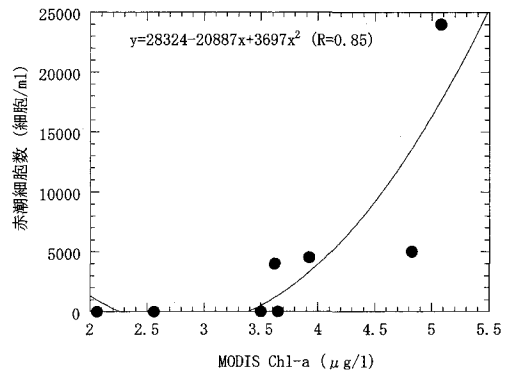


図-5 広島湾(2003年9月4日)におけるMODIS Chl-aと赤潮細胞数の関係

25000細胞/ml程度の赤潮が発生していたことがわかる。両者を関数として表す場合、MODIS Chl-aが3.5 µg/l以上の時、次式で表す2次関数で比較的良好近似($R=0.85$)が得られる。

$$y = 28324 - 20887x + 3697x^2 \quad \dots\dots\dots (18)$$

ここで、 y は赤潮細胞数、 x はMODIS Chl-a(本提案手法を使用した値)である。これらの結果より、MODISの

輝度データから、MODIS Chl-a の計算を経て赤潮細胞数
をある程度推定することが可能であることがわかった。

7. ま と め

本研究では毎日無料で提供される海色センサ MODIS
を利用し、従来使われなかったバンド（波長帯）の組み
合わせにより、赤潮分布を推定するモデルを提案し、こ
のモデルの妥当性を現場データ及び水中光学モデルを
使って検証した。その結果、広島湾における赤潮（高
Chl-a）推定モデルとして提案した MODIS 「バンド
14 (678 nm) とバンド 13 (667 nm) の輝度比」は、外洋
モデルと比べ現場 Chl-a との相関が高く ($R=0.82$),
Chl-a 推定精度は $0.66 \mu\text{g/l}$ (RMS 誤差) であった。また、
水中光学モデルによると、提案したモデルは無機懸濁物
質の影響を抑える効果があり、高濃度の Chl-a 推定モ
デルとして妥当であると考えられた。さらに、提案したモ
デルを使って推定した広島湾の MODIS Chl-a と赤潮分
布はよく一致しており、MODIS の輝度データから赤潮
生物の細胞数をある程度推定することが可能であること
がわかった。

今後は、MODIS データを使った Chl-a 推定モデルの
精度を高めるとともに、RS により赤潮プランクトンの
種別を判別する方法や高解像度・高スペクトル分解能画
像 (EO-1 衛星等) による赤潮分布の推定方法等を検討し
たい。そして最終的には CFD による水質予測モデルを
応用し、RS データを初期値としたデータ同化手法によ
る赤潮発生予測を行いたいと考えている。

謝辞：本研究で使用した MODIS データは、東京大学
生産技術研究所安岡研究室から提供を受けた。記して謝

辞を表する。

参 考 文 献

- 岡見 登・岸野元彰・宮崎忠国 (1982): 霞ヶ浦湖水の分光反射
率と水質, 日本リモセン学会誌, 2 巻, 1 号, pp. 21-31.
- 沖 一雄・安岡善文 (1996): 高濃度水域における近赤外を含む
二波長によるクロロフィル a 推定モデルの作成, 日本リモ
セン学会誌, 16 巻, 4 号, pp. 1-9.
- 土田 聡 (1998): 超多バンドデータのための加法因子簡易除
法の検証, 日本リモセン学会第 24 回学術講演会論文集, pp.
239-240.
- 虎谷充浩・田中昭彦・福島 甫・陳 文忠・高橋 理・村上 浩
(2003): ADEOS-II/GLI の海色大気補正アルゴリズム, 日
本リモセン学会, 第 35 回学術講演会論文集, pp. 175-176.
- 松永恒雄・岩崎 晃・土田 聡・山野博哉 (2003): EO-1 Hyperion
石垣島東部データを用いたサンゴ礁ハイパースペクトル
データ処理手法の検討, 日本リモセン学会第 34 回学術講演
会論文集, pp. 259-260.
- 松山幸彦・木村 淳・藤井 斉・高山晴義・内田卓志 (1997): 1995
年広島湾西部で発生した *Heterocapsa circularisquama* 赤
潮の発生状況と漁業被害の概要, 南西水研研報, 30 号, pp.
189-207.
- Clark, D.K. (1997): Bio-optical algorithms -case 1 waters,
MODIS algorithm theoretical basis document (ATBD-
MOD-18), 50 p.
- Morel, A. and Prieur, L. (1977): Analysis of variation in ocean
color, Limnol. Oceanogr., Vol. 22, No. 4, pp. 709-722.
- Okami, N., Kishino, M., Sugihara, S., and Unoki, S. (1982):
Analysis of ocean color spectra (I) -Calculation of
irradiance reflectance-, J. Ocean. Soc. Japan, Vol. 38, pp.
208-214.
- Thiemann, S. and Kaufmann, H. (2002): Lake water quality
monitoring using hyperspectral airborne data - a
semiempirical multisensor and multitemporal approach for
the Mecklenburg Lake District, Germany, Rem. Sens.
Environ., Vol. 81, pp. 228-237.